

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

НИЖНИК ОЛЕКСАНДР ІГОРОВИЧ



УДК 681.8

ВИПРОМІНЮВАННЯ ГІДРОАКУСТИЧНИХ СИГНАЛІВ
ПЛАНАРНИМИ АНТЕННИМИ РЕШІТКАМИ, УТВОРЕНИМИ ІЗ
ЦИЛІНДРИЧНИХ П'ЄЗОКЕРАМІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Спеціальність 05.09.08 – прикладна акустика та звукотехніка

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2018

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі акустики та акустоелектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор

Лейко Олександр Григорович

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря
Сікорського» (м. Київ), професор кафедри акустики та
акустоелектроніки.

Офіційні опоненти – доктор технічних наук, професор

Мислович Михайло Володимирович

Інститут електродинаміки Національної академії наук
України (м. Київ), завідувач відділом теоретичної
електротехніки

– кандидат технічних наук, доцент

Мелешко Микола Андрійович,

Національний авіаційний університет, професор
кафедри комп'ютерних мультимедійних технологій

Захист відбудеться «22» березня 2018 р. о 14:30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д26.002.19 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» за адресою 03056, м. Київ-56, просп. Перемоги, 37, корпус 12, аудиторія 412.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» за адресою 03056, м. Київ-56, просп. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «__» _____ 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



В.Б. Швайченко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування теми дослідження. Планарні гідроакустичні антенні решітки знайшли широке застосування в практичній гідроакустиці. Як і інші гідроакустичні антени, вони виконують дві функції – функцію перетворення електричної енергії в механічну, а потім в акустичну в режимі випромінювання і функцію формування акустичного поля в оточуючих середовищах.

Складність сумісного математичного опису процесів, пов'язаних з цими двома функціями, і відсутність довгий час необхідних розрахункових моделей планарних антенних решіток обумовили необхідність розвитку аналітичних підходів до кожної з цих функцій окремо. При цьому необхідним елементом зв'язку між ними було задання значень коливальних швидкостей поверхонь перетворювачів антен. В розрахунковому плані такий підхід дозволив в деталях врахувати при описі другої функції антенної решітки вплив такого важливого фізичного явища при формуванні акустичного поля решіток як взаємодії їх перетворювачів по цьому полю, обумовленої багатократним перевідбиттям звукових хвиль, випромінюваних перетворювачами, від елементів решіток. Такий підхід був розвинутий в роботах Карновського М.І., Грінченка В.Т., Вовка І.В., Лейка О.Г., Шендерова Є.Л., Смарішева М.Д. та ін.

Суттєвим недоліком описаного підходу є те, що завдання сталих значень коливальних швидкостей на поверхнях перетворювачів принципово виключає можливість їх змін внаслідок змін акустичного поля решіток, обумовлених взаємодією по цьому полю їх перетворювачів. А оскільки в реалізації функції перетворення енергії перетворювачами решітки акустичні, механічні і електричні поля є пов'язаними між собою, наведені обставини є причиною того, що рівні всіх фізичних полів реальних антенних решіток суттєво відрізняються від розрахованих з використанням ідеалізованого підходу.

З метою усунення вказаних розбіжностей між розрахунковими і реальними параметрами антенних решіток в останні роки основні зусилля були направлені на розробку таких підходів до розрахунків антен, при яких в режимі випромінювання гідроакустичних сигналів для заданих рівнів електричного збудження перетворювачів антенних решіток можливо розрахувати рівні всіх фізичних полів, що приймають участь у перетворенні електричної енергії в акустичну і формуванні останньої в оточуючих середовищах. Ці підходи базуються на строгих методах розв'язку задач, в яких зв'язані поля діють в багатозв'язних областях. Розробці підходів, в яких функції в одиночних перетворювачах по перетворенню енергії і формуванню акустичних полів в оточуючих середовищах пов'язані між собою, значну увагу приділили Грінченко В.Т., Гузь О.М., Бабаєв А.Е., Вовк І.В., Кубенко В.Д., Лейко О.Г., Маципура В.Т., Петрищев О.М., Улітко А.Ф., Aronov B., Ebenezer D., Jim O., Ramesh R. та ін. В той же час розробці методів

розрахунку антенних решіток, утворених із циліндричних п'єзокерамічних перетворювачів, з урахуванням суттєвого впливу багатопланових особливостей їх конструктивного виконання на перетворення енергії і формування полів антенами приділялось мало уваги. Певні результати в цьому напрямку отримані Коржиком О.В. Тому розробка розрахункового забезпечення проектування планарних антен, в якому враховується взаємодія їх основних фізичних полів та вплив цих полів на параметри антенних решіток, є актуальною для практичної гідроакустики.

Зв'язок роботи з науковими планами, програмами, темами. Дисертаційну роботу виконано на кафедрі акустики та акустoeлектроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» в рамках науково-дослідної роботи «Сучасні завдання гідроелектропружності» (№ державної реєстрації 0113U008184) та держбюджетної НДР «Розробка ширококутового акустичного ехоспектрометра та нової ефективної програми універсального аудіологічного скринінгу новонароджених» (№ державної реєстрації 0116U003795).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розробка теоретичних засад проектування планарних антенних решіток, утворених із циліндричних п'єзокерамічних перетворювачів, з урахуванням взаємодії електричних, механічних і акустичних полів в процесі перетворення енергії і акустичних полів перетворювачів в процесі формування акустичного поля решіткою та практична реалізація цих засад.

Для досягнення цієї мети необхідно знайти розв'язок наступних завдань:

1. Розробка розрахункових моделей планарних антенних решіток, утворених із циліндричних п'єзокерамічних перетворювачів, з урахуванням особливостей виконання їх конструкцій;

2. Розвиток на основі методу зв'язаних полів в багатозв'язних областях ефективних підходів до розробки аналітичних співвідношень для визначення фізичних полів планарних антенних решіток та перетворювачів у їх складі з урахуванням конкретних геометричних розмірів, фізичних та хвильових властивостей елементів їх конструкцій.

3. Систематизовані дослідження з використанням одержаних розв'язків властивостей механічних, електричних та акустичних полів перетворювачів у складі решіток і вивчення закономірностей їх змін в залежності від характеристик конструкцій перетворювачів і решіток.

4. Експериментальне підтвердження адекватності запропонованих моделей і відповідності розрахункових значень параметрів реальним значенням планарних антенних решіток.

5. Фізична інтерпретація встановлених закономірностей і розробка на його основі конкретних рекомендацій по проектуванню планарних антенних решіток.

Об'єкт дослідження – процеси взаємного перетворення електричної, механічної та акустичної енергій циліндричними п'єзокерамічними

перетворювачами у складі планарних антенних решіток та взаємодії перетворювачів в решітках по акустичному полю при формуванні решітками акустичних полів.

Предмет дослідження – планарні антенні решітки, утворені із циліндричних п'єзокерамічних перетворювачів.

Методи дослідження. При виконанні досліджень використані методи постановки та розв'язку задач стаціонарної гідроелектропружності та математичної фізики: зокрема, це метод зв'язаних полів в багатозв'язних областях, метод часткових областей, метод розв'язку нескінченних систем лінійних алгебраїчних рівнянь та ін. Зокрема, методом зв'язаних полів в багатозв'язних областях розв'язані наскрізні задачі випромінювання звуку решітками п'єзокерамічних перетворювачів; метод часткових областей використано при одержанні співвідношень, які описують акустичні, механічні і електричні поля решітки і п'єзокерамічних перетворювачів силової та компенсованої конструкцій; метод розв'язку нескінченних систем лінійних алгебраїчних рівнянь застосовано для одержання чисельних значень шуканих фізичних полів.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше запропоновані нові розрахункові моделі, на їх основі строгими методами визначені аналітичні співвідношення для фізичних полів решіток та циліндричних п'єзокерамічних перетворювачів у їх складі.

2. З використанням методу зв'язаних полів в багатозв'язних областях шляхом вирішення задачі випромінювання гідроакустичних сигналів планарними антенними решітками, утвореними із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів, одержані аналітичні співвідношення для опису електричних, механічних та акустичних полів решітки.

3. Для планарних антенних решіток, утворених із циліндричних п'єзокерамічних перетворювачів, вперше виконані систематизовані дослідження властивостей решіток та перетворювачів у їх складі, обумовлені взаємодією електричних, механічних та акустичних полів перетворювачів при перетворенні енергії і взаємодією їх акустичних полів в решітці при формуванні її акустичного поля, в залежності від конструкційних, фізичних та хвильових характеристик решіток та перетворювачів.

4. Врахування зв'язаності фізичних полів при перетворенні енергії і взаємодії п'єзокерамічних перетворювачів в решітці по акустичному полю при його формуванні дозволили вперше встановити для планарних антенних решіток:

- суттєві зміни механічних полів перетворювачів у складі антенних решіток порівняно з одиночними перетворювачами в частині появи в них крім нульової моди, на якій при вибраному способі їх електричного збудження при випромінюванні «закачується» електрична енергія, наступних мод коливань, амплітуди яких порівняні з нульовою і залежать від місць розміщення перетворювачів в решітці, і ефективному перерозподілі енергії між модами;

- появу в спектрі частот акустичного поля решітки в області низьких частот кількох нових власних резонансних частот, значення яких в 3-5 разів менші основної резонансної частоти перетворювачів при порівняній енергетичній ефективності їх і в (7-10) разів менших резонансних смугах;

- закономірності в формуванні електричних полів перетворювачів планарних решіток: зокрема, вплив на керування повним струмом перетворювачів в різних частотних діапазонах різними його складовими; зміну та умови зміни режиму випромінювання енергії окремими перетворювачами у складі решітки в оточуюче середовище на її поглинання із нього.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

- розроблене розрахункове забезпечення надає можливість при виконанні проектних робіт по планарним антенним решіткам здійснювати пошук найбільш раціональних шляхів їх побудови в залежності від їх конкретних конструкційних характеристик;

- визначені умови, за яких можливо отримати ефективне випромінювання гідроакустичних сигналів на частотах, набагато нижчих від власних резонансних частот оболонок циліндричних перетворювачів;

- виявлені ефекти та умови їх виникнення, що призводять до погіршення енергетичної ефективності планарних антенних решіток.

- результати дисертаційної роботи впроваджені в Державному підприємстві «Київський науково-дослідний інститут гідроприладів» при виконанні розрахунків звукових полів циліндричних перетворювачів по контракту №15DMAC/YZD589UA від 28.08.2015 р. з КНР, при виконанні розрахунків звукових полів антенних решіток судових станцій по контракту №HKMS20150821-1 від 01.08.2015 р. з КНР, що підтверджується відповідним актом впровадження. Отримані результати використовуються в навчальному процесі КПІ ім. Ігоря Сікорського при підготовці технічних спеціалістів з акустики, зокрема, по дисциплінам «Електроакустичні перетворювачі» та «Акустичні антени».

Особистий внесок здобувача. В одержанні наукових та практичних результатів, що викладені в дисертаційній роботі, автору належать постановка та розв'язок задач, проведення чисельних досліджень, систематизований аналіз результатів та їх фізичне трактування. В патентах [9-12] здобувач виконав модельні розрахунки та провів аналіз отриманих результатів, виконав патентні дослідження.

Дисертаційна робота виконана на кафедрі акустики та акустoeлектроніки факультету електроніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» під керівництвом доктора технічних наук, професора Лейко О.Г.

Робота є результатом самостійних досліджень Нижника О.І.

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення та результати дисертації обговорювались на:

- акустичному симпозіумі «КОНСОНАНС – 2015», Київ, 2015;
- Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «Електроніка», Київ, 2013, 2016;
- II Міжнародній науково-технічній конференції «Інформаційні проблеми теорії акустичних, радіоелектронних та телекомунікаційних систем IPST-2013», Алушта, 2013;
- Міжнародній науково-технічній конференції «Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки», Київ, 2014, 2015;
- IV Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки», Київ, 2016.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 19 наукових праць, серед яких 7 статей у наукових фахових виданнях (з них 1 стаття у виданні іноземної держави, 6 у виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз даних), 1 стаття в іншому виданні, 4 патенти України, 7 тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура та об'єм дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та двох додатків. Загальний обсяг роботи становить 229 сторінок, у тому числі 142 сторінок основного тексту, 111 рисунків та списку використаних джерел із 126 найменувань.

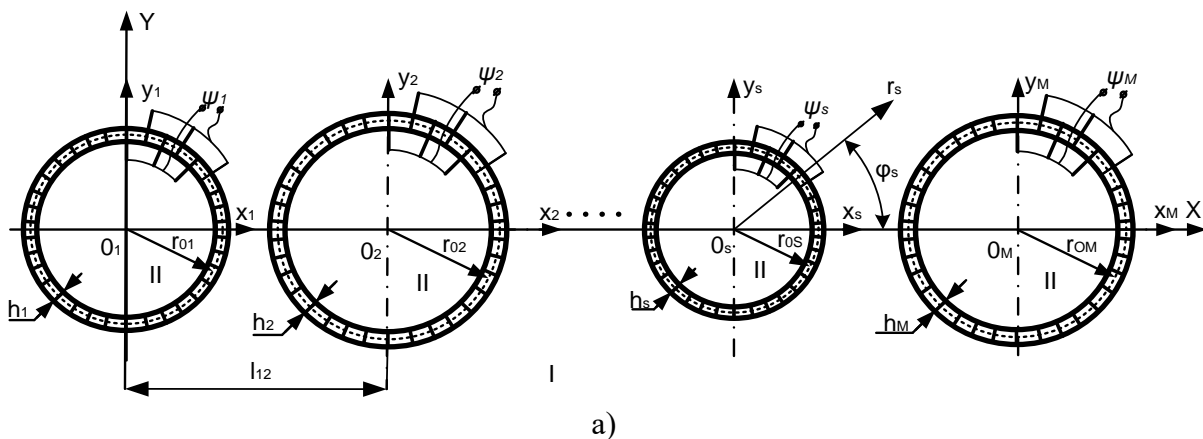
ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

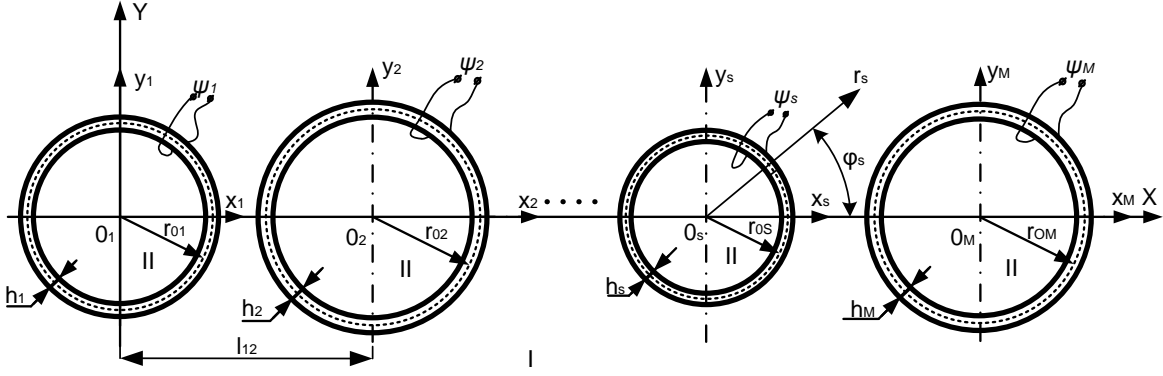
У **вступі** обґрунтовано вибір теми дослідження, актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету і задачі дослідження, визначено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, наведено дані щодо їх апробацій.

У **першому розділі** визначені конструктивні особливості планарних гідроакустичних антен, що складаються з циліндричних п'єзокерамічних перетворювачів, які необхідно враховувати при визначенні фізичних полів перетворювачів, і їх відображення в розрахункових моделях. Наведено розв'язок задачі визначення фізичних полів планарних антенних решіток, що складаються з циліндричних п'єзокерамічних перетворювачів з урахуванням як конструктивних особливостей самих решіток, так і особливостей конструкції перетворювачів у їх складі. До перших відносять кількість перетворювачів, відстані між ними та їх положення в решітці. До конструктивних особливостей перетворювачів відносяться наступні конструктивні елементи: тип п'єзокерамічного матеріалу, з якого виконано активний елемент перетворювача, його поляризація та характер її організації; тип внутрішнього заповнення, що визначає тип конструкції перетворювача - силова або компенсована; середній радіус та товщина оболонки перетворювача.

При збудженні перетворювачів планарної антени електричною напругою в ній відбувається декілька процесів. До них відносяться процеси перетворення енергії з електричної в механічну та з механічної в акустичну. Процес перетворення з механічної енергії в акустичну супроводжується тим, що кожен з перетворювачів антенної решітки формує акустичне поле навколо себе. При роботі перетворювачів в антені на поле тиску, що створюється кожним в результаті випромінювання акустичних хвиль, накладаються поля, створювані іншими перетворювачами, та поля хвиль, відбитих всіма перетворювачами антени. Таким чином, має місце процес взаємодії перетворювачів в антені по акустичному полю. Для опису формування акустичного поля необхідно застосувати хвильове рівняння. Процеси електромеханічного перетворення енергії в перетворювачах решітки можна описати рівняннями стану п'єзокераміки та диференціальними рівняннями електропружних коливань циліндричних тіл.

Розрахункова схема планарної антенної решітки, що складається з циліндричних п'єзокерамічних перетворювачів, зображена на рис. 1. Планарна гідроакустична антена являє собою плоску антенну решітку, утворену з кінцевого числа M перетворювачів. Поздовжні вісі перетворювачів паралельні між собою та лежать в одній площині. Кожен з перетворювачів представляє собою нескінченну герметизовану п'єзокерамічну оболонку, внутрішня порожнина якої вакуумована або заповнена повітрям з нормальним атмосферним тиском (силова конструкція), або в ній знаходиться рідина чи повітря з надлишковим тиском (компенсована конструкція). Збудження перетворювачів в антенні відбувається шляхом підведення до обкладинок електродів кожного з перетворювачів гармонійного електричного сигналу $\psi^{(s)} = \psi_0^{(s)} e^{-i\omega t}$, де $\psi_0^{(s)}$ – електрична напруга, ω – частота збудження, а s – номер перетворювача в антенній решітці.





б)

Рис. 1. Поперечний переріз антени з окружною (а) та радіальною (б) поляризаціями їх перетворювачів

З урахуванням прийнятих припущень фізичні поля випромінювання планарної антенної решітки можуть бути визначені через спільне рішення:

- хвильового рівняння Гельмгольца, що описує рух пружних середовищ всередині та ззовні перетворювачів:

$$\Delta \Phi^{(s)} + (k_{is})^2 \Phi^{(s)} = 0; \quad (1)$$

де $\Phi^{(s)}$ – потенціал коливальної швидкості s -го перетворювача, Δ – оператор Лапласа в циліндричній системі координат, $k_{is} = 2\pi/\lambda$ – хвильове число всередині ($k_{is} = k_s$) і зовні ($k_{is} = k$) s -го перетворювача.

- диференціальних рівнянь електромеханічних коливань s -го циліндричного перетворювача в вакуумі у циліндричних координатах. Для перетворювачів з окружною поляризацією вони мають вигляд:

$$(1 + \beta^{(s)}) \frac{\partial^2 u^{(s)}}{\partial \varphi_s^2} + \frac{\partial w^{(s)}}{\partial \varphi_s} - \beta^{(s)} \frac{\partial^3 w^{(s)}}{\partial \varphi_s^3} = \alpha^{(s)} \gamma^{(s)} \frac{\partial^2 u^{(s)}}{\partial t^2}, \quad (2)$$

$$-\frac{\partial u^{(s)}}{\partial \varphi_s} + \beta^{(s)} \left(\frac{\partial^3 u^{(s)}}{\partial \varphi_s^3} - \frac{\partial^4 w^{(s)}}{\partial \varphi_s^4} \right) - w^{(s)} + \frac{e_{33}^{(s)} r_{os}}{C_{33}^{E(s)}} E_{\varphi}^{(0)s} + \frac{\alpha^{(s)}}{h_s} q_r^{(s)} = \alpha^{(s)} \gamma^{(s)} \frac{\partial^2 w^{(s)}}{\partial t^2}. \quad (3)$$

Для перетворювачів з радіальною поляризацією визначають наступним чином:

$$(1 + \beta^{(s)}) \frac{\partial^2 u^{(s)}}{\partial \varphi_s^2} + \frac{\partial w^{(s)}}{\partial \varphi_s} - \beta^{(s)} \frac{\partial^3 w^{(s)}}{\partial \varphi_s^3} = \alpha^{(s)} \gamma^{(s)} \frac{\partial^2 u^{(s)}}{\partial t^2}, \quad (4)$$

$$-\frac{\partial u^{(s)}}{\partial \varphi_s} + \beta^{(s)} \left(\frac{\partial^3 u^{(s)}}{\partial \varphi_s^3} - \frac{\partial^4 w^{(s)}}{\partial \varphi_s^4} \right) - w^{(s)} + \frac{e_{31}^{(s)} r_{os}}{C_{11}^{E(s)}} E_r^{(0)s} + \frac{\alpha^{(s)}}{h_s} q_r^{(s)} = \alpha^{(s)} \gamma^{(s)} \frac{\partial^2 w^{(s)}}{\partial t^2}. \quad (5)$$

Тут $u^{(s)}$, $w^{(s)}$ – окружна та радіальна складові вектору зміщень точок серединної поверхні s -го перетворювача;

$\beta^{(s)} = (h_s)^2 / 12 r_{os}^2 (1 + (e_{31}^{(s)})^2 / C_{11}^{E(s)} \epsilon_{33}^{s(s)})$, $\alpha^{(s)} = r_{os}^2 / C_{11}^{E(s)}$ – для радіальної поляризації; $\beta^{(s)} = (h_s)^2 / 12 r_{os}^2 (1 + (e_{33}^{(s)})^2 / C_{33}^{E(s)} \epsilon_{33}^{s(s)})$, $\alpha^{(s)} = r_{os}^2 / C_{33}^{E(s)}$ – для

окружної поляризації; $q_r^{(s)}$ – зовнішнє навантаження s -го перетворювача; $C_{11}^{E(s)}, C_{33}^{E(s)}, \varepsilon_{33}^{(s)}, e_{31}^{(s)}, e_{33}^{(s)}$ – модулі пружності при нульовій електричній напруженості, діелектрична проникність при нульовій деформації та п'єзоконстанти матеріалу s -го перетворювача, відповідно; $\gamma^{(s)}$ – густина матеріалу; h_s – товщина стінки оболонки випромінювача; $E_\varphi^{(0)s}$ та $E_r^{(0)s}$ – електрична напруженість в матеріалі s -го перетворювача для окружної та радіальної поляризації, відповідно;

- умов відсутності вільних носіїв енергії в об'ємі матеріалу п'єзокерамічного s -го перетворювача та безвихоровий характер електричного поля s -го перетворювача, що дозволяє представити його скалярним потенціалом в досліджуваному діапазоні частот, відповідно

$$\operatorname{div} \vec{D}^{(s)} = 0, \vec{E}^{(s)} = -\operatorname{grad} \psi^{(s)}, \quad (6)$$

де $\vec{E}^{(s)}, \vec{D}^{(s)}$ – вектори напруженості та індукції електричного поля s -го перетворювача.

Відповідно до методу «зв'язаних полів» усю область існування акустичного поля можна розділити на окремі області (рис. 1): I область – робоча область зовнішнього середовища з параметрами $\rho c (|\varphi_s| \leq \pi, r_s \geq r_{1s})$; II область – внутрішня область перетворювача з параметрами $\rho_s c_s (|\varphi_s| \leq \pi, 0 \leq r_s \leq r_{2s})$.

Відповідний набір умов спряження полів на межах цих областей доповнює загальну систему рівнянь, що описують роботу решітки. Такі умови мають наступний вигляд:

- на поверхні кожного перетворювача виконуються умови рівності швидкостей коливання часточок середовища та швидкостей нормальних зміщень поверхні перетворювачів:

$$\frac{dw^{(s)}}{dt} = \frac{-d\Phi_2^{(s)}}{dr_s}, \quad 0 \leq |\varphi_s| \leq \pi, r_{2s} = r_{os} - h_s / 2, s = 1, \dots, M, \quad (7)$$

$$\frac{dw^{(s)}}{dt} = \frac{-d\Phi_1}{dr_s}, \quad 0 \leq |\varphi_s| \leq \pi, r_{1s} = r_{os} + h_s / 2; s = 1, \dots, M. \quad (8)$$

тут $\Phi_2^{(s)}$ – потенціал швидкості поля у внутрішньому середовищі s -го перетворювача; Φ_1 – повний потенціал швидкості поля випромінювання планарної антенної решітки; r_{1s} та r_{2s} – зовнішній та внутрішній радіуси s -го перетворювача.

- на поверхні кожного перетворювача виконується умова рівності нормальних складових тензора напруг $\sigma_r^{(s)}$ звуковому тиску, взятому зі зворотним знаком

$$\sigma_r^{(s)} = -q_r^{(s)} = -(P_1 - P_2^{(s)}), \quad 0 \leq |\varphi_s| \leq \pi; s = 1, \dots, M, \quad (9)$$

тут $P_2^{(s)} = \rho_s d\Phi_2^{(s)} / dt$ и $P_1 = \rho d\Phi_1 / dt$ – радіаційні навантаження від динамічного тиску.

- напруженість електричного поля в матеріалі п'єзокерамічної оболонки s-го перетворювача при окружній та радіальній поляризації має вигляд, відповідно:

$$E_\varphi^{(s)} = -N^{(s)} \psi_0^{(s)} / (2\pi r_{os}), \quad (10)$$

$$E_r^{(s)} = -\psi_0^{(s)} / h_s. \quad (11)$$

де $N^{(s)}$ – кількість призм у перетворювачах з окружною поляризацією.

- складові електричної індукції вздовж окружності, радіусу та поздовжньої вісі описуються виразами для перетворювачів з окружною поляризацією:

$$D_\varphi^{(s)} = \varepsilon_{33}^{(s)} E_\varphi^{(s)} + e_{33}^{(s)} \left(\frac{du^{(s)}}{d\varphi_s \cdot r_{os}} + \frac{w^{(s)}}{r_{os}} \right), \quad D_r^{(s)} = D_z^{(s)} = 0, \quad (12)$$

для перетворювачів з радіальною поляризацією

$$D_r^{(s)} = \varepsilon_{33}^{(s)} E_r^{(s)} + e_{31}^{(s)} \left(\frac{du^{(s)}}{d\varphi_s} + w^{(s)} \right) \frac{1}{r_{os}} + e_{33}^{(s)} \left(\frac{du^{(s)}}{dr_{os}} \right), \quad D_\varphi^{(s)} = D_z^{(s)} = 0. \quad (13)$$

- для кожного з перетворювачів виконується умова Зоммерфельда та відсутність особливостей полів у внутрішній порожнині перетворювачів.

Акустичні потенціали $\Phi_2^{(s)}$ та $\Phi_1^{(s)}$ визначимо як:

- в області I: $\Phi_1^{(s)}(r_s, \varphi_s) = \sum_{-\infty}^{\infty} A_n^{(s)} H_n^{(1)}(kr_s) e^{in\varphi_s}, \quad s=1, \dots, M. \quad (14)$

- в області II: $\Phi_2^{(s)}(r_s, \varphi_s) = \sum_{-\infty}^{\infty} B_n^{(s)} J_n(k_s r_s) e^{in\varphi_s}, \quad s=1, \dots, M. \quad (15)$

Коефіцієнти $A_n^{(s)}$ та $B_n^{(s)}$, що входять до співвідношень (14) та (15), визначаються з умов спряження задачі; $H_n^{(1)}(kr_s)$ та $J_n(k_s r_s)$ – функція Ханкеля першого роду та функція Бесселя, відповідно.

Зміщення оболонок в ряди по власним функціям коливань оболонок в вакуумі визначимо як:

$$u^{(s)} = \sum_{-\infty}^{\infty} u_n^{(s)} e^{in\varphi_s}, \quad w^{(s)} = \sum_{-\infty}^{\infty} w_n^{(s)} e^{in\varphi_s}. \quad (16)$$

Після ряду перетворень, в тому числі із використанням теорем додавання циліндричних функцій, та застосування властивостей повноти та ортогональності систем кутових функцій на відповідних інтервалах загальна система рівнянь, що описує роботу планарної антенної решітки, набуває вигляду нескінченної системи лінійних алгебраїчних рівнянь:

- для антен з перетворювачами з окружною поляризацією:

$$\left\{ \begin{aligned} & ic_s w_n^{(s)} - B_n^{(s)} J'_n(k_s r_{2s}) = 0; \\ & A_n^{(s)} + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq s}}^M \sum_{m=-\infty}^{\infty} A_m^{(q)} \frac{J'_n(k_s r_{1s})}{H_n^{(1)'}(k_s r_{1s})} H_{n-m}^{(1)}(kr_{sq}) e^{i(n-m)\varphi_{sq}} - \frac{ic_s w_n^{(s)}}{H_n^{(1)'}(kr_{1s})} = 0; \\ & R_n^{(s)} B_n^{(s)} \frac{J'_n(k_s r_{2s})}{ic_s} + \frac{i\omega\alpha^{(s)}\rho}{h_s} \left[A_n^{(s)} H_n^{(1)}(kr_{1s}) + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq s}}^M \sum_{m=-\infty}^{\infty} A_m^{(q)} J_n(kr_{1s}) H_{n-m}^{(1)}(kr_{sq}) e^{i(n-m)\varphi_{sq}} \right] + \\ & + \frac{i\omega\alpha^{(s)}\rho_s}{h_s} B_n^{(s)} J_n(k_s r_{2s}) = \frac{N^{(s)} e_{33}^{(s)} \Psi_0^{(s)}}{4\pi^2 C_{33}^{E(s)}} Q_n; \quad s=1, \dots, M; \quad n=-\infty, \infty. \end{aligned} \right. \quad (17)$$

- для антен з перетворювачами з радіальною поляризацією:

$$\left\{ \begin{aligned} & ic_s w_n^{(s)} - B_n^{(s)} J'_n(k_s r_{2s}) = 0; \\ & A_n^{(s)} + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq s}}^M \sum_{m=-\infty}^{\infty} A_m^{(q)} \frac{J'_n(k_s r_{1s})}{H_n^{(1)'}(k_s r_{1s})} H_{n-m}^{(1)}(kr_{sq}) e^{i(n-m)\varphi_{sq}} - \frac{ic_s w_n^{(s)}}{H_n^{(1)'}(kr_{1s})} = 0; \\ & R_n^{(s)} B_n^{(s)} \frac{J'_n(k_s r_{2s})}{ic_s} + \frac{i\omega\alpha^{(s)}\rho}{h_s} \left[A_n^{(s)} H_n^{(1)}(kr_{1s}) + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq s}}^M \sum_{m=-\infty}^{\infty} A_m^{(q)} J_n(kr_{1s}) H_{n-m}^{(1)}(kr_{sq}) e^{i(n-m)\varphi_{sq}} \right] + \\ & + \frac{i\omega\alpha^{(s)}\rho_s}{h_s} B_n^{(s)} J_n(k_s r_{2s}) = \frac{r_{0s} e_{31}^{(s)} \Psi_0^{(s)}}{2\pi h_s C_{11}^{E(s)}} Q_n; \quad s=1, \dots, M; \quad n=-\infty, \infty. \end{aligned} \right. \quad (18)$$

де $R_n^{(s)} = \left[n + \beta^{(s)} n^3 \right]^2 / \left[(1 + \beta^{(s)}) n^2 - \omega^2 \alpha^{(s)} \gamma^{(s)} \right] - \left[1 + \beta^{(s)} n^4 - \omega^2 \alpha^{(s)} \gamma^{(s)} \right]$; Q_n - коефіцієнти, пов'язані із ортогональністю кутових функцій.

Для забезпечення збіжності системи замінимо невідомі $A_n^{(s)}$ та $B_n^{(s)}$ новими невідомими $\tilde{A}_n^{(s)}$ та $\tilde{B}_n^{(s)}$ за формулами $\tilde{A}_n^{(s)} = A_n^{(s)} H_n^{(1)'}(kr_{1s})$ та $\tilde{B}_n^{(s)} = B_n^{(s)} J'_n(k_s r_{2s})$, що дозволить перетворити нескінченну систему до вигляду квазірегулярної і застосувати для її вирішення метод усічення або послідовних наближень. Кількість невідомих $w_n^{(s)}$, $\tilde{A}_n^{(s)}$, $\tilde{B}_n^{(s)}$ визначається з умови забезпечення мінімальної похибки при виконанні умов (7)-(8).

Наступні три розділи присвячені дослідженню властивостей фізичних полів та закономірностей їх поведінки в залежності від конструктивних особливостей планарних антен та перетворювачів у їх складі. Усі числові розрахунки виконувались для наступних числових значень параметрів та характеристик елементів конструкцій перетворювачів та антен:

- для дослідження приймалися наступні склади п'єзокерамічного матеріалу: ЦТБС-3, ЦТС-19, ТБК-3;

- середні радіуси оболонок та їх товщини змінювались відповідно в діапазонах $r_{os} = 0,068 \div 0,12$ м та $h_s = 0,008 \div 0,012$ м;

- окружна поляризація перетворювачів у складі решітки забезпечувалась жорстким з'єднанням $N^{(s)} = 48$ призм, що складають оболонки;

- електрична напруга, якою збуджувались перетворювачі, становила $\psi_0^{(s)} = 200$ В;

- кількість перетворювачів у складі антенної решітки змінювалась в діапазоні $M = 3 \div 5$;

- відстань між вісями сусідніх перетворювачів змінювалась в діапазоні $l_{qs} = 0,147 \div 0,2$ м;

- внутрішні порожнини п'єзокерамічних оболонок перетворювачів вакуумувались ($\rho_s c_s = 0$), заповнюватись повітрям при нормальному атмосферному тиску ($\rho_s c_s = 419,1$ кг/м²с) або рідинами з різними густиною та швидкістю звуку ($\rho_s c_s = 1,5 \cdot 10^6$ кг/м²с; $1,2 \cdot 10^6$ кг/м²с; $0,75 \cdot 10^6$ кг/м²с);

- аналіз наведено в частотному діапазоні $f = 0 \div 20000$ Гц.

Другий розділ присвячено дослідженню властивостей механічних полів. В якості параметрів, що досліджувались, приймалися амплітудні і фазові частотні та кутові залежності нормальної складової коливальної швидкості на зовнішній поверхні перетворювачів. Розрахунки виконувались згідно з виразами (7)-(8) та (16)-(18).

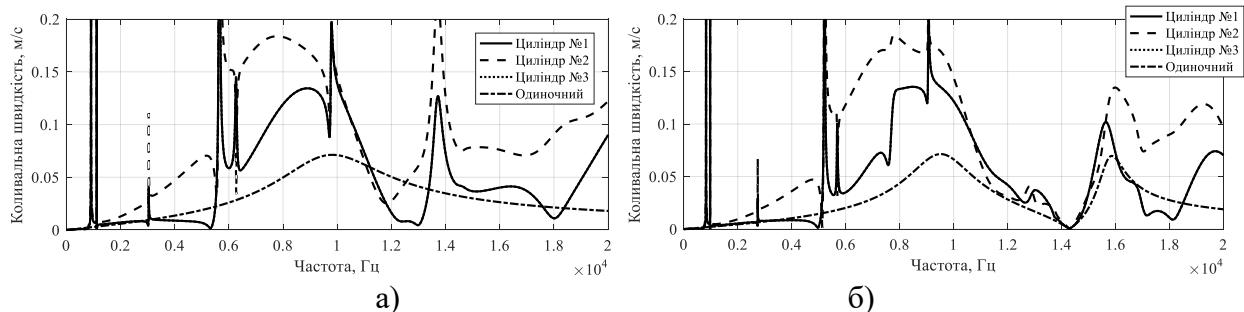


Рис. 2. Частотні залежності амплітуд радіальних коливальних швидкостей поверхні перетворювачів силової (а) та компенсованої (б) конструкції у складі триелементної решітки

Аналіз частотних характеристик амплітуд (рис. 2) свідчить про суттєві зміни характеру частотної залежності коливальної швидкості поверхні перетворювачів, що працюють у складі антени, порівняно з одиночним перетворювачем. Ці зміни полягають в появі в механічному полі перетворювачів додаткових резонансних коливань у всьому частотному діапазоні та суттєвій зміні частотної характеристики в області резонансної частоти його оболонок. Особливо цікавим є поява механічних резонансів в області частот нижче від частоти резонансної області. При цьому амплітуди коливальної швидкості на цих частотах порівняні або значно перевищують амплітуди швидкості в області основного резонансу оболонок. Суттєві зміни механічного поля полягають ще і в тому, що частотні залежності амплітуд і

фаз коливальних швидкостей перетворювачів значно відрізняються між собою в залежності від місця розташування перетворювачів в решітці (рис. 3). В той же час в низькочастотній області частоти додаткових резонансів майже однакові для всіх перетворювачів антени.

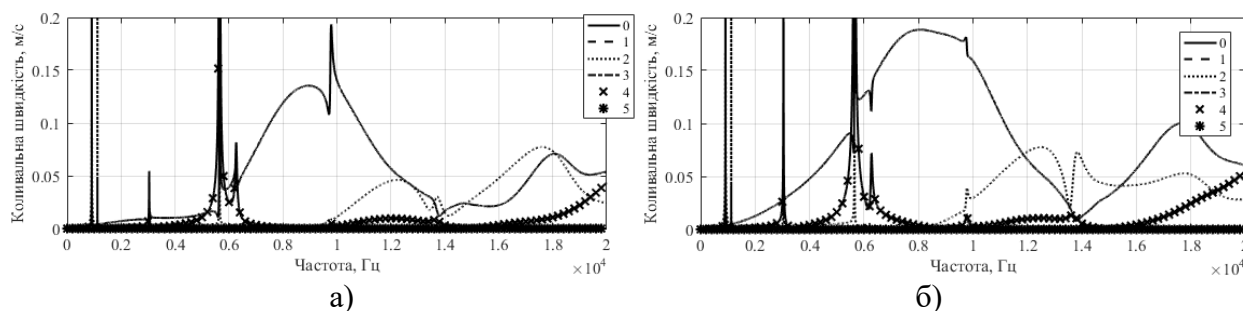


Рис. 3. Частотні залежності амплітуд коливальної швидкості мод коливань крайніх (а) та середнього (б) перетворювачів силової конструкції у складі триелементної решітки

Крім частотних суттєвих змін зазнають і кутові залежності амплітуд і фаз радіальних коливальних швидкостей перетворювачів у складі планарних антен порівняно з одиночними (рис. 4).

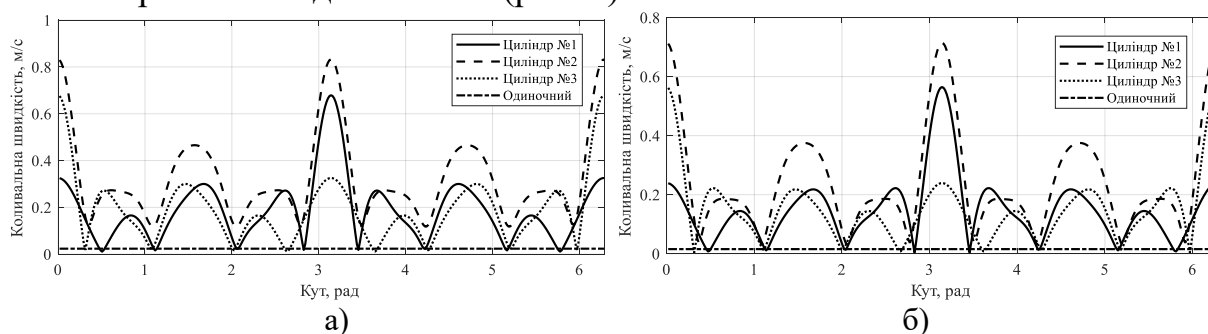


Рис. 4. Кутові залежності амплітуд коливальної швидкості перетворювачів силової (а) та компенсованої (б) конструкцій у складі триелементної решітки

Ці зміни полягають у втраті кутової однорідності коливальної швидкості поверхонь перетворювачів. Ступінь неоднорідності механічного поля залежить від робочої частоти антени та місця розташування перетворювача в антені. Особливо великою вона стає на частотах додаткових резонансів

Із аналізу умов роботи перетворювачів в планарній антенній решітці, ясно, що фізичними причинами змін механічних полів циліндричних перетворювачів у складі планарної антенної решітки при їх збудженні на нульовій моді коливань порівняно з одиночним перетворювачем є порушення радіальної симетрії радіаційного навантаження перетворювачів. Це порушення зумовлено плоскою формою антенної решітки, за якої різні перетворювачі антенної решітки по-різному навантажуються реакцією оточуючого середовища на збудження в ньому звукових хвиль, та взаємодією між собою перетворювачів по акустичному полю, обумовленою багатократним обміном перетворювачами в антенній решітці випромінюваними та розсіяними (відбитими) хвилями. В системі з радіальною симетрією електричного навантаження та з порушеною симетрією радіаційного навантаження окрім нульової моди генеруються

наступні моди механічних коливань, амплітуда коливань яких порівняна з нульовою модою. Це означає, що має місце ефект перерозподілу енергії, яка «закачується» у перетворювачі на нульовій моді, між всіма модами коливань. Такий перерозподіл енергії між всіма модами спричинює суттєву зміну механічних полів перетворювачів антени порівняно з одиночним.

В залежності від типу обраної конструкції антени та середовища, що заповнює внутрішню порожнину перетворювачів, можна спостерігати наступні закономірності змін в механічних полях перетворювачів у складі антени порівняно з одиночним:

- появу додаткових вузькосмугових резонансних коливань в механічних полях перетворювачів силової конструкції;
- формування додаткових механічних резонансів різними модами коливань;
- появу великої кількості нових, окрім додаткових дуже вузькосмугових резонансів у заповнених повітрям перетворювачів, що зумовлено їх внутрішнім пружним простором;
- збереження додаткових вузькосмугових резонансів при переході від силової конструкції до компенсованої;
- збільшення амплітуди додаткових резонансів при зменшенні відстані між перетворювачами в антенній решітці;
- збільшення амплітуди додаткових вузькосмугових резонансів при збільшенні кількості перетворювачів в антенній решітці;
- зміна амплітуди та значень частот додаткових резонансів при зміні відстані між перетворювачами.

Зміна складу п'єзокерамічного матеріалу оболонок перетворювачів, а значить, зміна їх електрофізичних констант зумовлює кількісні зміни як частотних, так і кутових залежностей амплітуди коливальної швидкості п'єзокерамічних оболонок. До аналогічних змін приводить зміна типу поляризації п'єзокерамічної оболонки.

Зміна геометрії п'єзокерамічних оболонок перетворювачів не впливає на симетрію електричного навантаження, проте змінює ступінь порушення радіальної симетрії радіаційного навантаження. Також вона призводить до кількісних змін значень амплітуди і значень частот додаткових резонансів та основного резонансу оболонок решітки.

Третій розділ присвячено дослідженню властивостей акустичних полів планарних антенних решіток. В якості параметрів, що досліджувалися, приймалися амплітудні та фазові частотні залежності значень звукового тиску на поверхні перетворювачів антенної решітки та кутові залежності для ближнього поля і для дальнього поля.

З урахуванням виду потенціалів поля всередині (15) та зовні (14) перетворювачів вирази для тиску набувають вигляду:

$$P_2^{(s)}(r_s, \varphi_s) = -i\omega\rho_2^{(s)} \sum_{-\infty}^{\infty} B_n^{(s)} J_n(k_s r_s) e^{in\varphi_s}, \quad s=1, \dots, M, \quad 0 < r_s < r_{2s}, \quad 0 < |\varphi_s| < \pi, \quad (18)$$

$$P_1(r_s, \varphi_s) = -i\omega\rho_1 \left[A_n^{(s)} H_n^{(1)}(kr_s) e^{in\varphi_s} + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq s}}^M \sum_{m=-\infty}^{\infty} A_m^{(q)} J_n(kr_s) H_{m-n}^{(1)}(kr_{qs}) e^{i(m-n)\varphi_{qs}} e^{im\varphi_s} \right], \quad (19)$$

$$s = 1, \dots, M, \quad r_{1s} < r_s, \quad 0 < |\varphi_s| < \pi.$$

Оцінку діаграм напрямленості еквідистантної планарної системи та перетворювачів у її складі будемо проводити за допомогою наступних виразів відповідно:

$$R(\varphi) = |\Phi(\varphi)| / \max |\Phi(\varphi)|,$$

$$\Phi(\varphi) = \left(\frac{2}{\pi k r} \right)^{1/2} e^{i\left(-\frac{\pi}{4} + kr\right)} \sum_{s=1}^M e^{-ikl(s-1)\cos(\varphi)} \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n^{(s)} e^{-i\frac{\pi}{2}n} e^{in\varphi}, \quad s = 1, \dots, M, \quad 0 < \varphi < \pi, \quad (20)$$

$$\Phi^{(s)}(\varphi) = \left(\frac{2}{\pi k r} \right)^{1/2} e^{i\left(-\frac{\pi}{4} + kr\right)} e^{-ikl(s-1)\cos(\varphi)} \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n^{(s)} e^{-i\frac{\pi}{2}n} e^{in\varphi}, \quad s = 1, \dots, M, \quad 0 < \varphi < \pi, \quad (21)$$

де l – відстані між поздовжніми вісями перетворювачів.

Частотні залежності амплітуд тиску, приведені на рис. 5,а, свідчать про появу додаткових резонансних викидів акустичного тиску у всьому діапазоні досліджуваних частот. Ці зміни зумовлені змінами коливань механічного поля, що були встановлені раніше, при цьому частоти цих резонансних викидів співпадають з частотами механічних резонансів перетворювачів у складі антен. Перехід від перетворювачів силової конструкції до перетворювачів компенсованої, з різними фізичними характеристиками заповнення (рис.5,б), призводить до зміни характеру акустичного тиску в резонансній та високочастотній областях порівняно з акустичним полем антени з перетворювачами силової конструкції.

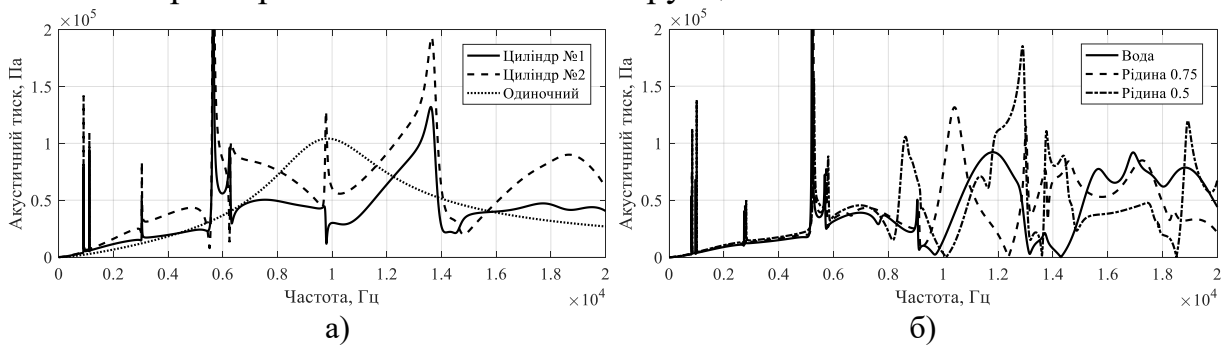


Рис. 5. Частотні залежності амплітуд акустичного тиску на поверхні перетворювачів силової (а) та компенсованої (б) конструкції у складі триелементної решітки

Як встановлено при дослідженні механічних полів, поява нових мод коливань, наступних за нульовою, обумовлена порушенням радіальної симетрії радіаційного навантаження перетворювачів у складі антени. Про це свідчать кутові розподіли акустичного тиску на поверхні перетворювачів в антені (рис. 6,а). При цьому ступінь порушення залежить від багатьох факторів, в т.ч. від місця розміщення перетворювачів в антенній решітці. У середніх перетворювачів кутовий розподіл акустичного тиску є симетричним

відносно вісі антенної решітки та нормалі до неї, у крайніх – лише відносно вісі решітки.

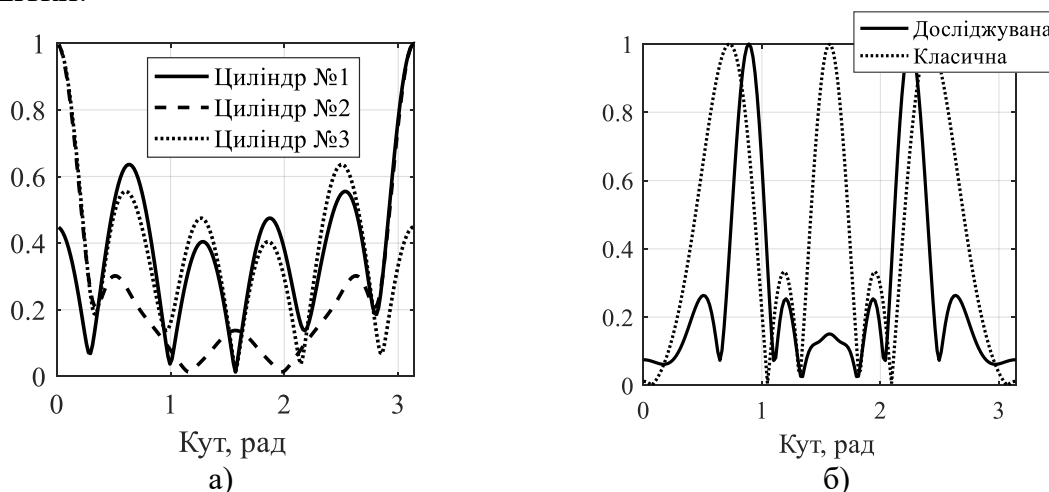


Рис. 6. Кутовий розподіл нормованого акустичного тиску на поверхні перетворювачів (а) та в дальньому полі (б) триелементної решітки

Дослідження акустичних полів в залежності від складу п'єзокераміки та характеру її поляризації, кількості перетворювачів в антенні та відстані між ними, діаметру та товщини оболонок перетворювачів свідчить про наступні зміни акустичних полів:

- розширення спектру частот власних акустичних резонансів антени;
- зміщення спектру в область частот, в (3-5) разів нижчих від частоти основного резонансу оболонок перетворювачів;
- вузькість смуги нових власних резонансних частот акустичних полів (50-60) Гц;
- втрату всіма перетворювачами радіальної симетрії акустичного навантаження;
- залежність ступеню несиметричності навантаження від всіх конструктивних параметрів антен і місця розташування перетворювачів в антені;
- значні зміни напрямленості антен на частотах нових резонансів, порівняно з іншими частотами.

З метою підтвердження відповідності припущень, які були прийняті при розв'язку сформульованих задач реальним особливостям планарних антен, були виконані експериментальні дослідження ряду параметрів антен і проведено їх співставлення з розрахунковими даними. Фотографії експериментального макета антени та вимірювального стенда представлені на рис. 7 і 8. Макет антени являє собою решітку, утворену із двох циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів. Активні елементи випромінювачів мали окружну поляризацію, склад п'єзокераміки ЦТБС-3 і силову конструкцію. П'єзокерамічні оболонки їх мали висоту $H=265$ мм, діаметр $r_{1s}=64.5$ мм і товщину $h_s=5$ мм. Відстань між їх поздовжніми

вісями в антені становила $l_{12} = 74.5 \text{ мм}$. Електричне збудження здійснювалося напругою $U = 200 \text{ В}$ на частотах $f = 12, 14, 16 \text{ кГц}$.

Досліджувані параметри наступні: частотні залежності амплітуди акустичного тиску на зовнішній поверхні випромінювачів у складі антени та нормовані кутові залежності акустичного тиску в дальній зоні на частоті $f = 16 \text{ кГц}$.

Для оцінки частотної залежності в безпосередній близькості до поверхні одного з випромінювачів розміщувався сферичний гідрофон діаметром 5 мм.



Рис. 7. Експериментальний макет антени

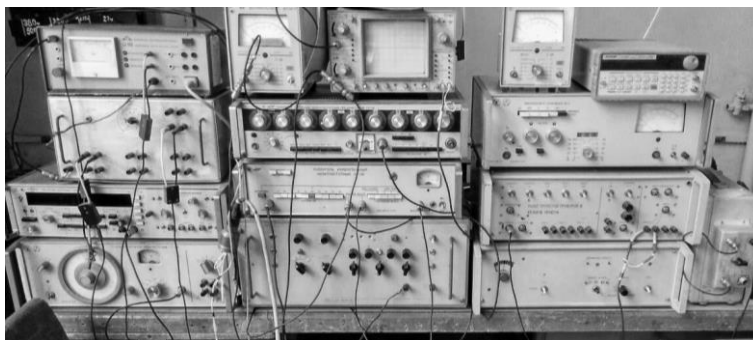


Рис. 8. Вимірювальний стенд

Вимірювання проводились в ДП «КНДІ гідроприладів» у заглушеному вимірювальному басейні у відповідності до вимог, регламентованих ОСТ5.8361-86. Кількість незалежних реалізацій вимірювань була прийнята 7, що забезпечувало:

- середньоквадратичну похибку вимірювань кутових залежностей 0,08 при довірчій вірогідності 0,95;
- середньоквадратичну похибку при вимірюванні частотної залежності не гірше 0,24 при довірчій вірогідності 0,95.

Розрахункові і експериментальні результати представлені на рис.9-10.

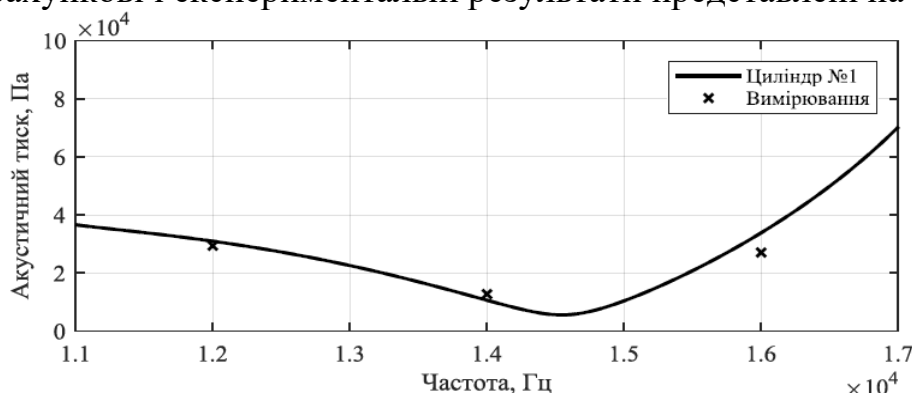


Рис. 9. Частотні залежності амплітуди акустичного тиску на поверхні випромінювача у складі антенної решітки

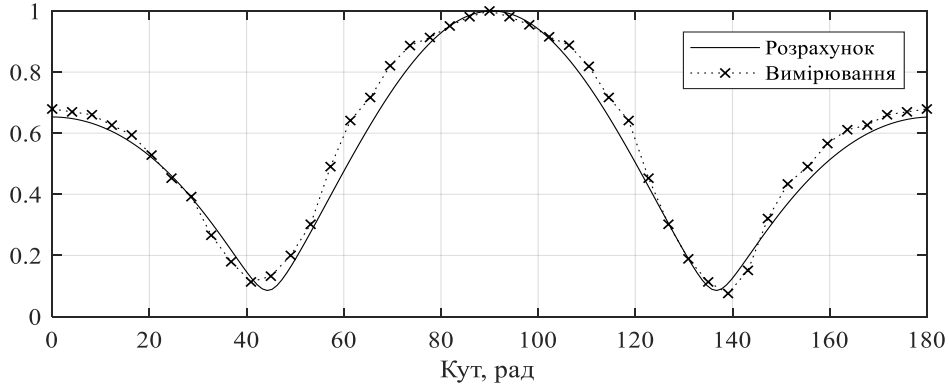


Рис. 10. Кутові залежності амплітуди акустичного тиску антени в дальньому полі на частоті $f = 16 \text{ кГц}$

Їх співставлення дозволяє зробити висновок, що розроблене в роботі розрахункове забезпечення проектування планарних антенних решіток, утворених із циліндричних п'єзокерамічних випромінювачів, відповідає реаліям досліджуваних антен.

Четвертий розділ присвячено дослідженню електричних полів планарних антен. Виходячи зі схем електро механічного заміщення перетворювача в трактах випромінювання сигналів, які використовуються при проектуванні цих трактів, в якості досліджуваних характеристик електричного поля були прийняті наступні: повний електричний струм, його активна і реактивна складові, що подаються від генератора на перетворювач при його збудженні; повний вхідний електричний опір перетворювача та його активна та реактивна складові.

Аналітичні вирази, за якими проводились розрахунки електричних полів перетворювачів у складі антенної решітки, були отримані на одиницю висоти перетворювача зі співвідношень (12)-(13) у вигляді:

- для перетворювачів з окружною поляризацією:

$$I^{(s)} = -i\omega S_{el}^{(s)} \left\{ -\varepsilon_{33}^{(s)} \frac{\psi_0^{(s)} (N^{(s)})^2}{2\pi r_{os}} + \frac{e_{33}^{(s)}}{r_{os}} \sum_{j=1}^{N^{(s)}} \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} i n u_n^{(s)} e^{in2\pi j/N^{(s)}} + \sum_{n=-\infty}^{\infty} w_n^{(s)} e^{in2\pi j/N^{(s)}} \right] \right\},$$

- для перетворювачів з радіальною поляризацією:

$$I^{(s)} = -i\omega \int_0^{2\pi} \left[-\varepsilon_{33}^{(s)} \frac{\psi_0^{(s)}}{h_s} + \frac{e_{31}^{(s)}}{r_{os}} \left(\sum_{n=-\infty}^{\infty} i n u_n^{(s)} e^{in\varphi_s} + \sum_{n=-\infty}^{\infty} w_n^{(s)} e^{in\varphi_s} \right) \right] r_{os} d\varphi_s.$$

Вхідний електричний імпеданс $Z_{el}^{(s)}$ s -го перетворювача визначено за законом Ома:

$$Z_{el}^{(s)} = \psi_0^{(s)} / I^{(s)}.$$

Із наведених виразів витікає, що струм збудження s -го перетворювача включає дві складові – ємнісну, якій відповідає перший доданок, та динамічну, яка описується другим доданком.

Дослідження електричних струмів перетворювачів у складі антенної решітки дозволяють встановити наступні закономірності в поведінці

електричного поля (рис. 11). По-перше, ємнісні складові електричного струму у вхідних електричних колах перетворювачів є однаковими. Не залежно від параметрів п'єзокерамічних перетворювачів антенної решітки їх амплітуда зростає пропорційно частоті, а швидкість зростання визначається лише характеристиками складу п'єзокераміки оболонки перетворювача та його розмірами. По-друге, динамічні складові крайніх та середніх перетворювачів антенної решітки суттєво відрізняються між собою. По-третє, амплітуда та загальна форма частотної залежності повного струму визначаються співвідношенням амплітуд та формою його динамічної та ємнісної складових. При цьому характер частотної залежності динамічного струму визначається частотними залежностями нульової моди коливальної швидкості перетворювачів у складі антени (рис. 3). По-четверте, в різних частотних діапазонах повний струм визначається різними складовими: в низькочастотній області ємнісною і динамічною складовою; в резонансній області – динамічною; в високочастотній області – переважно ємнісною.

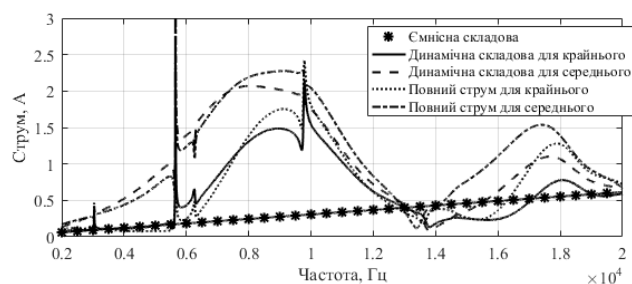


Рис. 11. Частотні залежності амплітуди повного струму та його ємнісної та динамічної складових вакуумованих перетворювачів у складі триелементної решітки

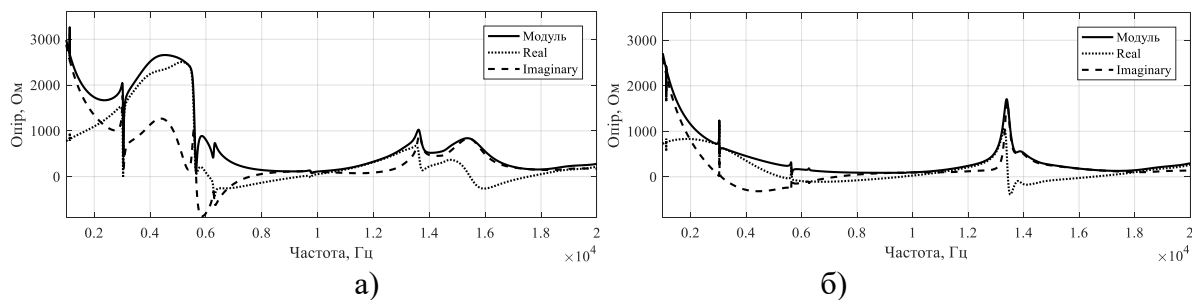


Рис. 12. Частотні залежності опорів крайнього (а) та середнього (б) вакуумованих перетворювачів у складі триелементної решітки

Дослідження електричних опорів (рис. 12) п'єзокерамічних перетворювачів у складі антенної решітки дозволяють встановити наступні закономірності. По-перше, для усіх випадків більша частина електричного опору має ємнісний характер, його амплітуда спадає зі збільшенням частоти. По-друге, в частотних характеристиках опору присутні вузькосмугові резонанси великої амплітуди, кількість та положення яких також визначаються характеристиками решітки та перетворювачів у її складі. По-третє, в частотних характеристиках опорів перетворювачів існує ряд частот, на яких активні складові опору набувають від'ємних значень, а реактивні змінюють характер опору з ємнісного на індуктивний. Від'ємний активний опір свідчить про те, що перетворювач антенної решітки переходить з

режиму поглинання електричної енергії від свого генератора та випромінювання акустичної енергії в середовище в режим поглинання акустичної енергії з середовища та генерації електричної енергії на своєму вході. Кількість цих частот та їх положення визначаються характеристиками решітки та перетворювачів у її складі.

Виявлені ефекти пояснюються двома факторами. По-перше, внаслідок порушення радіальної симетрії радіаційного навантаження перетворювачів при їх роботі у складі планарної антенної решітки відбувається генерація наступних за нульовою мод коливань. І на деяких частотах енергія, що випромінюється цими модами в зовнішнє середовище, перевищує енергію, яка генерується нульовою модою коливань, на якій збуджується перетворювач антенної решітки. В цьому випадку акустична енергія зовнішнього середовища «закачується» у перетворювачі на нульовій моді його коливань. По-друге, оскільки в антенній решітці є кілька перетворювачів, на окремих частотах виникають ситуації, при яких окремі перетворювачі «вкачують» свою акустичну енергію в інші перетворювачі решітки знову ж таки на нульовій моді їх коливань.

ВИСНОВКИ

Основні результати дисертаційної роботи полягають в наступному.

1. В постановках задач стаціонарної гідроелектропружності відносно випромінювання гідроакустичних сигналів планарними антенними решітками, утвореними із циліндричних п'єзокерамічних перетворювачів, вперше запропоновані нові розрахункові моделі, які дозволяють системно врахувати вплив конструктивних характеристик решіток та перетворювачів на їх фізичні поля, які взаємодіють між собою при випромінюванні сигналів.

2. Методом зв'язаних полів в багатозв'язних областях шляхом розв'язку наскрізних задач випромінювання гідроакустичних сигналів планарними антенними решітками, утвореними із циліндричних п'єзокерамічних перетворювачів, одержані аналітичні співвідношення для опису електричних, механічних та акустичних полів решіток та їх перетворювачів. При розв'язку задач враховані взаємодія цих полів в процесі перетворення енергії, взаємодія перетворювачів в решітці між собою по акустичному полю, реакції зовнішнього та внутрішнього середовищ перетворювачів на збудження в них акустичних полів та залежність всіх перерахованих факторів від конкретних геометричних, фізичних та хвильових властивостей конструкцій решіток та перетворювачів.

3. Вперше при випромінюванні гідроакустичних сигналів планарними антенними решітками, утвореними із циліндричних п'єзокерамічних перетворювачів, систематизовано з єдиних методичних позицій досліджені властивості та взаємодія між собою електричних, механічних та акустичних полів решіток і перетворювачів, встановлені якісні та кількісні закономірності впливу на них геометричних, фізичних та хвильових характеристик таких конструкційних елементів решіток і

перетворювачів як розміри та склад решіток, тип конструкції перетворювачів, фізичні параметри середовища у їх внутрішньому об'ємі, розміри, склад п'єзокераміки та тип її поляризації.

4. Вперше встановлено та досліджено ряд нових фізичних властивостей планарних антенних решіток, обумовлених взаємодією полів як різної фізичної природи, так і акустичних полів перетворювачів у складі решітки, а саме:

- суттєві зміни механічних полів циліндричних п'єзокерамічних перетворювачів у складі антенних решіток, порівняно з одиночним перетворювачем, в частині появи в них крім нульової наступних мод коливань і ефективного перерозподілу між ними енергії, яка «закачується» в п'єзокерамічні оболонки перетворювачів решітки на нульовій моді їх коливань. Фізично це обумовлено взаємодією фізичних полів при перетворенні енергії перетворювачами з різними схемами їх електричного та акустичного навантажень у складі антенних решіток. При вибраному способі електричного збудження перетворювачів електричне навантаження є радіально симетричним. В той же час завдяки взаємодії перетворювачів по акустичному полю у складі планарної антенної решітки радіаційне акустичне навантаження кожного перетворювача втрачає свою радіальну симетрію і стає залежним від місця розміщення його в антенній решітці та інших конструктивних параметрів;

- розширення спектру власних резонансних частот акустичних полів решіток, обумовлене виникненням в механічних полях циліндричних п'єзокерамічних перетворювачів мод коливань, наступних за нульовою. При цьому в області низьких частот з'являються додаткові резонанси, кількість яких збільшується при збільшенні кількості перетворювачів в решітці. Частоти цих додаткових резонансів в 3-5 раз нижче від частоти нульової моди коливань оболонок перетворювачів, смуги резонансних частот в (7-10) разів менші резонансної смуги оболонок перетворювачів на нульовій моді, а амплітуди акустичного поля близькі або більші її амплітуди;

- закономірності формування електричних полів перетворювачів у складі антенних решіток. До них належать залежність керування повними електричними струмами перетворювачів антенних решіток в їх зовнішніх ланцюгах від області робочих частот та зміна і умови змін характеристик поведінки активних та реактивних складових електричних опорів перетворювачів у складі решіток в частотних областях. В низькочастотній області ці закономірності визначаються поведінкою ємнісної і динамічної складових повного струму, в області основного резонансу – тільки динамічним струмом, в високочастотній області – переважно ємнісним струмом. Умови зміни поведінки активного електричного опору перетворювачів виникають в тих діапазонах частот, де акустичне поле антенної решітки суттєво перевищує акустичні поля перетворювачів у складі решітки, обумовлені нульовою модою коливань перетворювачів. При цьому частина акустичного поля решітки поглинається окремими її

перетворювачами і повертається знову ж таки тільки на нульовій моді в електричне поле цих перетворювачів.

5. Отримані розрахунковим шляхом дані підтверджені експериментально, що свідчить про адекватність розрахункових моделей реальним планарним антенним решіткам.

6. Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

- створені можливості при виконанні проектних робіт по планарним антенним решіткам здійснювати пошук найбільш раціональних шляхів їх побудови завдяки виконанню розрахунків кількісних значень параметрів електричних, механічних та акустичних полів перетворювачів решіток в залежності від їх конкретних конструкційних характеристик: кількості перетворювачів у складі антенної решітки та відстаней між ними; типу конструкції перетворювачів та фізичних характеристик їх внутрішніх середовищ; діаметрів та товщин п'єзокерамічних оболонок перетворювачів, складу утворюючих їх п'єзокерамік та характеру їх поляризації;

- визначені умови, при яких на класичних планарних антенних решітках можливо отримати ефективне випромінювання гідроакустичних сигналів в вузькосмугових резонансах, частоти яких в 3-5 разів нижчі від власних резонансних частот оболонок циліндричних перетворювачів;

- виявлені ефекти та умови їх виникнення, при яких значно погіршується енергетична ефективність планарних антенних решіток та суттєво ускладнюється узгодженість перетворювачів у складі решіток із збуджуючими їх електронними генераторами.

Результати дисертаційної роботи впроваджені в Державному підприємстві «Київський науково-дослідний інститут гідроприладів», що підтверджується актом впровадження.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. А. Г. Лейко и А. И. Нижник, «Физические поля планарных гидроакустических антенн, образованных из цилиндрических пьезокерамических излучателей», *Электроника и связь*, №2, С.100-106, 2015. *Особистий внесок здобувача полягає в постановці задачі (Index Copernicus).*
2. А. Г. Лейко, А. И. Нижник и Н. В. Богданова, «Особенности электромеханического преобразования энергии цилиндрическим пьезокерамическим излучателем в составе системы излучателей», *Българско списание за инженерно проектиране*, С. 15-21, Апрель 2016. *Особистий внесок здобувача полягає в постановці задачі, проведенні розрахунків параметрів механічних полів антени та їх аналізі (іноземне видання, Болгарія, Технічний університет Софії)*
3. А. Г. Лейко, А. И. Нижник, Н. Д. Гладких и Я. И. Старовойт, «Электрические свойства цилиндрических пьезокерамических

- излучателей силовой и компенсированной конструкции с окружной поляризацией», *Электроника и связь*, № 3, С. 62-72, 2014. *Особистий внесок здобувача полягає в проведенні розрахунків параметрів електричних полів антени та їх аналізі (Index Copernicus).*
4. А. Г. Лейко, А. И. Нижник и И. В. Кандрачук, «Механические поля цилиндрических пьезокерамических излучателей силовой конструкции, образующих планарные гидроакустические антенны», *Электроника и связь*, № 6, С. 42-50, 2015. *Особистий внесок здобувача полягає в проведенні розрахунків параметрів механічних полів антени та їх аналізі (Index Copernicus).*
 5. А. Г. Лейко, А. И. Нижник и Я. И. Старовойт, «К вопросу об излучении звука цилиндрическими пьезокерамическими преобразователями различной конструкции», *Электроника и связь*, № 1, С. 81-94, 2014. *Особистий внесок здобувача полягає в постановці задачі (Index Copernicus).*
 6. А. Г. Лейко, А. И. Нижник и Я. И. Старовойт, «Звуковые поля пьезокерамических излучателей с различным пьезоэффектом», *Электроника и связь*, № 5, С. 50-55, 2013. *Особистий внесок здобувача полягає в проведенні розрахунків параметрів акустичних полів випромнювачів та їх аналізі (Index Copernicus).*
 7. А. Г. Лейко, А. И. Нижник и Я. И. Старовойт, «Акустические свойства цилиндрических пьезокерамических излучателей силовой и компенсированной конструкции с продольным и поперечным пьезоэффектом», *Электроника и связь*, № 6, С. 62-73, 2013. *Особистий внесок здобувача полягає в проведенні розрахунків параметрів акустичних полів перетворювачів та їх аналізі (Index Copernicus).*
 8. А. И. Нижник и А. Г. Лейко, «Частотные характеристики электрических полей цилиндрических пьезокерамических излучателей в составе плоских систем», *Журнал нано- та електронної фізики*, т.8, №4, С.4012-4018, 2016. *Особистий внесок здобувача полягає в проведенні розрахунків параметрів електричних полів антени та їх аналізі (SCOPUS).*
 9. Д. А. Дерепя, О. Г. Лейко, Я. И. Старовойт, О. И. Нижник, З. Т. Гусак, А. В. Косяновський, О. О. Расстригин, С. М. Розгонаев, И. В. Аверичев и Ю. Я. Меленко, «Циліндричний гідроакустичний перетворювач». Україна. Патент на корисну модель №99064, 12.05.2015. *Особистий внесок здобувача полягає у проведенні патентних досліджень та розробці опису винаходу.*
 10. Д. А. Дерепя, О. Г. Лейко, О. И. Фалеев, Я. И. Старовойт, О. И. Нижник и З. Т. Гусак, «Активно-пассивна система «Гідроакустична станція – надводний корабель»». Україна. Патент на корисну модель №100428, 27.07.2015. *Особистий внесок здобувача полягає у проведенні патентних досліджень та розробці опису винаходу.*

11. Д. А. Дерепя, О. Г. Лейко, А. О. Куцак, А. М. Кацан, О. С. Ісаєнко, О. М. Коньок, О. О. Кочарян, О. І. Джаназян, Я. І. Старовойт, О. І. Нижник и З. Т. Гусак, «Направлений циліндричний гідроакустичний перетворювач». Україна. Патент на корисну модель №99634, 10.06.2015. *Особистий внесок здобувача полягає у проведенні патентних досліджень, моделюванні та розробці опису винаходу.*
12. О. Є. Павлюк, Г. Д. Липовецька, Є. В. Карпенко, В. Ю. Соловей, В. С. Коцюба, О. В. Смідович, Р. О. Зацерковський, О. І. Нижник, О. С. Гурін, Ю. Я. Меленко и В. В. Білоус, «Позиційна шумопеленгаторна станція». Україна. Патент на корисну модель №105308, 01.03.2016. *Особистий внесок здобувача полягає у проведенні патентних досліджень, моделюванні та розробці опису винаходу.*
13. А. Г. Лейко, А. И. Нижник, "Информационные проблемы теории акустических, радиоэлектронных и телекоммуникационных систем IPST-2013". Тези доповідей на II науково-технічній конференції, «Излучение звука цилиндрическим пьезокерамическим преобразователем, расположенным в кольцевом слое материала с произвольной жесткостью отдельных участков», С. 16, Алушта, 2013.
14. А. И. Нижник. "КОНСОНАНС 2015". Тези доповідей акустичного симпозіуму. «Физические поля планарных гидроакустических антенн, образованных из цилиндрических пьезокерамических излучателей с радиальной поляризацией», С. 158-163, Київ, 2015.
15. О. І. Нижник. "Електроніка 2013". Тези доповідей на VI міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених. «Излучение звука водозаполненным цилиндрическим преобразователем с поперечным пьезоэффектом», С. 25-28, Київ, 2013.
16. О. І. Нижник. "Електроніка 2016". Тези доповідей на IX міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених. «Механические поля водозаполненных цилиндрических пьезокерамических излучателей, образующих планарные гидроакустические антенны», С. 16-19, Київ, 2016.
17. О.І. Нижник, "Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки." Тези доповідей на V науково-технічній конференції, «О расчете параметров плоских антенкорабельных гидроакустических станций, образованных из пьезокерамических преобразователей», С. 235-237, Київ, 2014.
18. О.І. Нижник, "Проблеми координації воєнно-технічної та оборонно-промислової політики в Україні. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки." Тези доповідей на IV міжнародній науково-практичній конференції, «О возможности снижения спектра планарных антенн в область низких частот», С.334-335, Київ, 2016.

19. О. І. Нижник, Н. Д. Гладкіх, Д. С. Маслов, З. Т. Гусак, Я. І. Старовойт, А. О. Святненко, "Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки". Тези доповідей на VI науково-технічній конференції, «Станція пошуку плавців-диверсантів», Київ, 2015. *Внесок здобувача полягає в проведенні математичного моделювання.*

АНОТАЦІЯ

Нижник О.І. Випромінювання гідроакустичних сигналів планарними антенними решітками, утвореними із циліндричних п'єзокерамічних перетворювачів. - На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.08 - прикладна акустика та звукотехніка. - Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», МОН України, Київ, 2017.

Дисертацію присвячено розробці розрахункових моделей планарних гідроакустичних антенних решіток, що складаються з циліндричних п'єзокерамічних перетворювачів в постановці задачі задач стаціонарної гідроелектропружності відносно випромінювання ними гідроакустичних сигналів. Розроблені методи дозволяють системно врахувати вплив конструктивних характеристик решіток та перетворювачів у їх складі на їх фізичні поля. Особлива увага приділена врахуванню взаємодії цих полів в процесі перетворення енергії, взаємодія перетворювачів в решітці між собою по акустичному полю, реакції зовнішнього та внутрішніх середовищ перетворювачів на збудження в них акустичних полів та залежність всіх перерахованих факторів від конкретних геометричних, фізичних та хвильових властивостей конструкцій решіток та перетворювачів. Проведено чисельні експерименти та їх систематизований комплексний аналіз. Дана фізична інтерпретація отриманих результатів.

Ключові слова: гідроакустична антена, планарна антенна решітка, фізичні поля, випромінювання гідроакустичних сигналів, циліндричний п'єзокерамічний перетворювач, конструктивні особливості.

АННОТАЦИЯ

Нижник А.И. Излучения гидроакустических сигналов планарными антенными решетками, образованными из цилиндрических пьезокерамических преобразователей. - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.08 - прикладная акустика и звукотехника. - Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», МОН Украины, Киев, 2017.

Диссертация посвящена разработке расчетных моделей планарных гидроакустических антенных решеток, состоящих из цилиндрических пьезокерамических преобразователей в постановке задачи задач

стационарной гидроэлектроупругости относительно излучения ими гидроакустических сигналов. Разработанные методы позволяют системно учесть влияние конструктивных характеристик решеток и преобразователей в их составе на их физические поля. Особое внимание уделено учету взаимодействия этих полей в процессе преобразования энергии, взаимодействие преобразователей в решетке между собой по акустическому полю, реакции внешних и внутренних сред преобразователей на возбуждение в них акустических полей и зависимость всех перечисленных факторов от конкретных геометрических, физических и волновых свойств конструкций решеток и преобразователей. Проведены численные эксперименты и их систематизированный комплексный анализ. Дана физическая интерпретация полученных результатов.

Ключевые слова: гидроакустическая антенна, планарная антенная решетка, физические поля, излучения гидроакустических сигналов, цилиндрический пьезокерамический преобразователь, конструктивные особенности.

SUMMARY

Nyzhnyk O.I. Radiation of hydroacoustic signals by planar antenna arrays formed from cylindrical piezoceramic transducers. - Manuscript.

The dissertation for a candidate of technical science degree in the specialty 05.09.08 - Applied Acoustics and Audio Engineering. - National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2017.

Given dissertation is devoted to the development of theoretical principles for the design and calculation of planar hydroacoustic antenna arrays consisting of cylindrical piezoceramic transducers in the formulation of the problems of stationary hydroelectroelasticity and mathematical physics with respect to the radiation of hydroacoustic signals by such type of antennas taking into account the interaction of electric, mechanical and acoustic fields and the practical realization of these principles. The developed methods allow systematically to take into account the influence of the structural characteristics of the arrays and transducers in their composition on their physical fields, which interact with each other at the emission of hydroacoustic signals.

On the basis of developed models using related fields method in the multiply coupled domains to solve tasks of emitting signals by planar sonar arrays formed from cylindrical piezoceramic transducers, the author obtained analytical expressions for the description of electric, mechanical and acoustic fields of planar sonar arrays and their transducers of power and compensated design. In the part of acoustic fields: the distribution of amplitudes of sound pressure in the near-range sonar array; characteristics of the beam pattern of the antenna arrays. In the part of mechanical fields: frequency and angle dependences of amplitudes and phases of radial and circumferential oscillation velocities for each transducer and modes of their oscillations. In the part of electric fields: the frequency dependence of the exciting electric current and the input electrical resistance of the transducers.

Particular attention is paid to the consideration of the interaction of these fields in the process of energy conversion, the interaction of the transducers in the array with each other through the acoustic field, the reaction of the external and internal media of the transducers to the excitation in them, acoustic fields, and the dependence of all these factors on the specific geometric, physical and wave properties of the arrays and transducers, namely: in the part of antenna arrays - the number of converters in the lattice and the distance between them; in the part of cylindrical piezoceramic transducers - the type of construction, the type of internal filling, the geometric dimensions, the type of piezoceramic material, and the type of polarization.

Numerical experiments were carried out for planar antenna arrays and systematic studies of the properties of electric, mechanical and acoustic fields and their connection between them were established and the qualitative and quantitative laws of the influence of geometric, physical and wave characteristics of structural elements of planar antenna arrays on the physical fields were established. Physical interpretation of the results is given.

Experimental studies have been carried out, the results allow us to conclude that the design support provided for the design of planar antenna arrays formed from cylindrical piezoceramic radiators is consistent with the realities of the antennas under study.

Conditions in which it is possible to obtain effective radiation of hydroacoustic signals at frequencies much lower than their own resonant frequencies of shells of cylindrical transducers were determined.

The ability to perform design work on planar antenna arrays has been created to search for the most rational ways of their construction by performing calculations of the quantitative values of the parameters of electric, mechanical and acoustic fields of designed planar sonar arrays and transducers in their composition, depending on their specific design characteristics.

The obtained results allow to carry out calculations of the quantitative values of the parameters of mechanical, acoustic and electric fields of planar antenna arrays formed from cylindrical piezoceramic converters, depending on the parameters and characteristics of concrete elements of their construction.

This, in turn, allows us to calculate the electrical elements in the schemes of substitution of piezoceramic radiators in design work for the coordination of electronic generators with emitters in radiating paths of hydroacoustic equipment.

The results of the dissertation work were introduced at the State Enterprise "Kyiv Research Institute of Hydraulic Devices" when performing calculations of sound fields of cylindrical emitters and calculations of sound fields of antenna arrays of court stations and in the educational process in Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute.

Keywords: sonar, planar antenna array, physical fields, hydroacoustic signal emittance, cylindrical piezoceramic transducer, related fields method, design features.